MODELOS DE INFILTRACIÓN Y FUNCIONES DE PEDOTRANSFERENCIA APLICADOS A SUELOS DE DISTINTA TEXTURA

ANA M LANDINI[1]; DANIEL MARTÍNEZ[1]; HUGO DÍAS[2]; EDUARDO SOZA[3]; DIEGO AGNES[3] & CLAUDIA SAINATO[1]

[1]Cátedra de Física. [2]Cátedra de Riego y Drenaje. [3]Cátedra de Maquinaria Agrícola.
Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Av. San Martín 4453, (C1417 DSE). Buenos Aires Argentina.
alandini@agro.uba.ar

Recibido: 29/05/07
Aceptado: 11/09/07

RESUMEN

El conocimiento del proceso de infiltración del agua en el suelo es de importancia en el diseño de sistemas de riego y en la predicción de la vulnerabilidad a la contaminación del suelo y de las aguas subterráneas. Por otra parte, es importante evaluar la eficiencia de los modelos hidrológicos que predicen el movimiento del agua en el suelo. El objetivo de este trabajo fue evaluar y comparar la bondad de ajuste de los modelos de infiltración de Kostiakov-Lewis (K-L) y Philip (Ph) a los datos experimentales, obtenidos en tres suelos: dos en la Pcia. de Buenos Aires y uno en el predio experimental de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires, Argentina. También se analizó la eficiencia de las funciones de pedotransferencia (FPT) de Saxton y Rawls (SyR) en la determinación de los parámetros hidráulicos de entrada del modelo de infiltración de Green y Ampt (GA) y en la predicción de la curva de liberación de agua. Los modelos de K-L y Ph ajustaron con R^2 mayores a 0,6 de lo cual se concluye que son altamente eficientes para describir el comportamiento de la infiltración de agua en los suelos estudiados. La mayor tasa de infiltración básica (fo) fue de 0,42 cm min^{-1} y correspondió a un suelo arcillo-limoso con enmienda orgánica. Los otros dos suelos, franco-limoso y franco-arcilloso, exhibieron valores máximos de 0,03 y 0,07 cm min^{-1} respectivamente. El modelo de GA, a partir de las FPT, predijo los valores de infiltración con coeficientes de eficiencia (CE) mayores a 0,8 para dos de los suelos estudiados, aunque se obtuvieron algunas discrepancias por debajo de los 20 cm de profundidad. Para el suelo franco limoso las FPT predijeron la curva característica de humedad con un CE cercano a 0,9. Se aconseja realizar un número pequeño de ensayos preliminares en cualquier suelo bajo estudio, y analizar la bondad de predicción de estas funciones en esos sitios, descartando de este modo, situaciones que se apartan de las hipótesis del modelo.

Palabras clave. Infiltración básica, Kostiakov-Lewis, Philip, Green-Ampt, curva característica de humedad.

INFILTRATION MODELS AND PEDOTRANSFER FUNCTIONS APPLIED TO SOILS WITH DIFFERENT TEXTURE

ABSTRACT

The knowledge of the process of water infiltration in soil is important in the design of irrigation systems and in the prediction of the vulnerability to the contamination of soil and groundwater. Moreover, it is important to evaluate the efficiency of the hydrological models that predict the movement of water in soil.

The objective of this study was to evaluate and to compare the goodness of fitting of Kostiakov-Lewis (K-L) and Philip (Ph) infiltration models to experimental data obtained from three soils: two of them at the Province of Buenos Aires, and the third one at the School of Agronomy's campus of the Buenos Aires University, (Argentina). Efficiency of Saxton and Rawls (SyR) pedotransfer functions (FPT) on the determination of the Green and Ampt (GA) model input hydraulic parameters and the prediction of the soil-moisture release curve were analyzed too. K-L and Ph models fitted data with R^2 coefficient greater than 0.6. Then it was concluded that these models accurately describe the infiltration process of the studied soils. The highest basic infiltration rate (fo) was 0.42 cm min^{-1} and corresponded to a silty clay soil with organic amendment, and for the other two soils (silt loam and clay loam) were 0.03 and 0.07 cm min^{-1} respectively. For two of the studied soils, GA model obtained from input parameters determined with the FPT, predicted the infiltration process with an efficiency coefficient (CE) greater than 0.8. However, at some cases, the fitting was not so good for dephts greater than 20 cm. For the silt loam soil, the FPT predicted the soil-moisture release curve with an CE close to 0.9. It might be suggested to carry out a preliminary few number of infiltration tests on any soil under study, and analyze the FPT and the GA model goodness of fit. In this way, the convenience of using these models could be evaluated.

Key words. Basic infiltration**,** Kostiakov-Lewis, Philip, Green-Ampt, soil-moisture release curve.

INTRODUCCIÓN

La infiltración del agua en el suelo y su movimiento en la zona no saturada del mismo es de fundamental importancia en la actividad agropecuaria. El proceso de infiltración influye en el intercambio de agua entre el sustrato y las plantas y se ve afectado por las labores realizadas en el suelo (Narro Faría, 1994). La infiltración, como una componente del ciclo hidrológico, está relacionada con el escurrimiento superficial que puede producir erosión y con la recarga de los acuíferos y su vulnerabilidad a la contaminación. Por lo tanto, es de suma importancia su evaluación para un manejo sustentable de las tierras que procure evitar su degradación. La determinación de los parámetros hidráulicos en la zona no saturada, tales como la sortividad y la conductividad hidráulica constituye el primer paso para poder utilizar modelos hidrológicos que puedan predecir el movimiento del agua.

Los modelos empíricos y teóricos tradicionalmente utilizados para describir el proceso de infiltración, entre los que se encuentran los de Kostiakov; Kostiakov-Lewis (K-L); Horton y Philip (Ph) (Ravi y Williams, 1998), permiten obtener los parámetros hidráulicos del suelo ajustando ecuaciones simples a los datos experimentales. Green y Ampt (GA) (Ravi y Williams, 1998) desarrollaron un modelo teórico que fue el primero con fundamentación física basado en el campo de flujo de Darcy. Este modelo ha sido ampliamente utilizado en física de suelos e hidrología debido a su simplicidad y satisfactoria aplicación para una gran variedad de problemas hidrológicos (Ravi y Williams, 1998). Sin embargo es recomendable, en los modelos, la utilización de variables de entrada, que sean de fácil obtención y bajo costo. En ese sentido, las funciones de pedotransferencia (FPT) (Tomasella *et al.*, 2003; Saxton y Rawls, 2006) apuntan a obtener los parámetros hidráulicos a partir de la medición sencilla de algunas propiedades del suelo. Actualmente hay varias de estas funciones validadas con bases de datos en el mundo, aunque hay bastante discusión respecto a su potencial para predecir los parámetros hidráulicos en suelos diferentes a los utilizados para su desarrollo (Moreira *et al*., 2004). Por lo tanto, es necesario obtener datos de las propiedades físicas e hidráulicas de suelos locales que permitan evaluar la eficiencia predictiva de esas funciones.

Entre los factores que influyen en la velocidad o tasa de infiltración que son fácilmente observables, se pueden mencionar: el contenido inicial de humedad del suelo, relacionado inversamente con la tasa de infiltración; la textura y estructura del suelo; la condición de superficie (suelo desnudo, con presencia de costra, o existencia de vegetación); cantidad de materia orgánica; temperatura del suelo y calidad del agua aplicada. Lado *et al.* (2004) hallaron que para suelos de textura franco arenosa, contenidos bajos de materia orgánica (< 2,3%) facilitan la ruptura de los agregados y la aparición de capas sellantes, con una consecuente disminución de la tasa de infiltración básica. Seguel *et al.* (2003) encontraron para suelos de textura gruesa tratados con enmiendas orgánicas (bioabono y estiércol bovino) un incremento significativo de la infiltración respecto de los mismos suelos sin tratar. Taboada y Micucci (2002), afirman que los suelos sometidos a pisoteo animal presentan menor aireación e infiltración. Osuna Ceja y Padilla Ramirez (1998) encontraron, una gran dependencia del coeficiente del término lineal del modelo de Philip con la conductividad hidráulica, para distintos tipos de suelos y condiciones de humedad inicial, por lo cual recomiendan realizar el análisis de estas variables en las situaciones que se pretenda estudiar. Young (1991), Chambou-Leyron (1993) y Aragón *et al.* (1997) encontraron gran variabilidad espacial y temporal en los valores de infiltración en los suelos que estudiaron.

Los objetivos principales de este trabajo fueron:

1. Evaluar y comparar la bondad de ajuste de los modelos de infiltración convencionales de Kostiakov-Lewis y Philip a datos experimentales obtenidos en suelos de distinta textura.
2. Evaluar para los mismos suelos, la eficiencia predictiva del modelo de Green y Ampt a partir de la aplicación de las funciones de pedotransferencia de Saxton y Rawls (SyR) en la determinación de los parámetros hidráulicos de entrada, con el propósito de evaluar en forma preliminar las limitaciones de este modelo.

Como objetivo secundario se evaluó el comportamiento de las FPT de SyR en la estimación de los valores de humedad en función de los potenciales mátricos (curva de retención hídrica).

MATERIALES Y MÉTODOS

Los ensayos de infiltración se llevaron a cabo en tres sitios: en una zona rural del partido de Carmen de Areco (Pcia. de Buenos Aires, 34° 28' 59" Lat. S y 60° 7' 6" Long. O), en suelo Argiudol ácuico (Mapa de Suelos de la Pcia. de Buenos Aires. INTA.1989) y en dos predios de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires (34° 25' Lat. S y 59° 15' Long. O), en suelo Argiudol vértico (Soil Survey Staff, 1994). Se empleó el método del doble anillo de Muntz (Burt, 1995) con carga hidráulica constante de 10 cm. La duración de cada ensayo fue aproximadamente de 2,5 horas, tomándose lecturas de la lámina infiltrada en intervalos de 1 minuto durante los primeros 5 minutos del ensayo y hasta 20 minutos en la última parte del mismo.

Carmen de Areco

En el predio perteneciente a un establecimiento de producción lechera se realizaron dos ensayos en un lote con pastura, identificado con el código 13a; dos en un corral de encierro previo al ordeñe (13b), en donde la concentración de animales es alta y dos ensayos en otro lote (19), sembrado con maíz y sin presencia actual de animales. La elección de estos sitios obedeció a que en el futuro se esperan analizar los riesgos de contaminación del suelo y agua subterránea por lixiviado de efluentes provenientes del tambo.

Facultad de Agronomía

Dieciséis ensayos correspondieron a un suelo que tuvo producción hortícola hasta el año 2003 (FAUBA1), dispuestos en una cuadrícula de 2 m x 8 m distanciados 4 m. Otros cuatro ensayos (M_1, M_2, M_3 y M_4) se realizaron en un suelo donde no hubo labores culturales en los últimos diez años (FAUBA2). Teniendo en cuenta la alta variabilidad que presentaron las curvas de infiltración en FAUBA1, la presencia de desniveles topográficos y distintas alturas de la pastura preexistente, se agruparon los ensayos en forma preliminar por similitud en la tasa de infiltración básica, tal como indica la Figura 1. Ésta se estimó para cada ensayo por la pendiente del ajuste lineal de los tres últimos puntos experimentales de infiltración acumulada (Cabria y Culot, 1999) en función del tiempo.

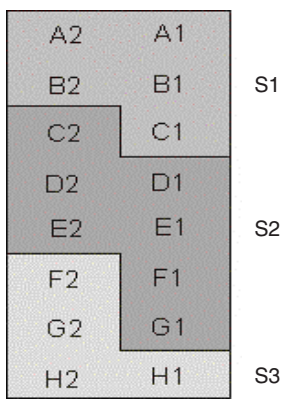


Figura 1. Ensayos (A1, A2,…,H2) agrupados en sectores (S) en FAUBA1.

Figure 1: Tests (A1, A2,…,H2) grouped by sets of tests (S) in FAUBA1.

Mediciones y análisis de datos

En cada uno de los sitios estudiados se determinaron la textura: porcentajes de arcilla (% arc) y arena (% are) (método de la pipeta, GW Gee & JW Bauder, 1986); contenido de materia orgánica (MO) a partir del método de Walkley y Black (Page, 1982), sobre cuatro muestras de suelo extraídas entre 0 y 20 cm de profundidad. Se determinaron la densidad aparente (δap) (método del cilindro de Blake y Hartge, 1986) y la humedad volumétrica inicial (θi) a partir de la medición de la humedad gravimétrica (diferencia de peso húmedo y seco) multiplicada por la densidad aparente, sobre tres muestras de suelo extraídas en las cercanías de cada ensayo de infiltración. Los valores medios de MO, δap y θi correspondientes a cada grupo de ensayos, se compararon con el Test de Tukey del programa InfoStat (2002).

Los datos obtenidos de infiltración acumulada de cada grupo de ensayos, se ajustaron globalmente, por regresión no lineal (GraphPad Prism, 2005) con los modelos de:

Kostiakov-Lewis $$F_{(t)} = k\, t^{\,n} + f\, t \qquad (1)$$

Philip $$F_{(t)} = S_0\, t^{\,0,5} + A\, t \qquad (2)$$

obteniéndose los parámetros hidráulicos:

k: vinculado a las condiciones de la humedad inicial del suelo

n: relacionado con la distribución estructural del suelo

f y *A:* parámetros relacionados con la tasa de infiltración básica para tiempos largos del ensayo

S_0*:* sortividad del suelo, dependiente de las condiciones de la humedad inicial y la conductividad hidráulica

Se evaluó la bondad de ajuste de cada modelo a través del coeficiente R^2 dado por el programa GraphPad Prism (2005).

La tasa de infiltración en función del tiempo se obtuvo derivando las ecuaciones (1) y (2) respecto del tiempo. La infiltración básica (fo) se determinó como promedio de los valores de la tasa para los últimos tres instantes del ensayo.

Asimismo, como estudio preliminar, en Carmen de Areco y FAUBA2 se contrastaron los datos experimentales de infiltración acumulada con los predichos ($F_{(t)}$) del modelo de GA, para suelos homogéneos:

$$F_{(t)} = K\, t + h_f\, \Delta\theta \ln\left(1 + \frac{F(t)}{h_f\, \Delta\theta}\right) \qquad (3)$$

donde los parámetros son:

$K = K_s$ /2 conductividad hidráulica del suelo (cm min^{-1})

K_s: conductividad hidráulica saturada (cm min^{-1})

h_f: potencial del frente húmedo (cm) relacionado con el potencial de entrada de aire (*he*) en la forma $h_f = 0{,}76\ he$

θ_s: humedad en estado de saturación ($cm^3\ cm^{-3}$)

$\Delta\theta = \theta_s - \theta_i$: variación de la humedad volumétrica, donde θi es el valor inicial en el ensayo ($cm^3\ cm^{-3}$)

La función es no lineal e implícita y se resolvió mediante el método de iteraciones sucesivas.

Se obtuvieron los parámetros de GA empleando las FPT de SyR, utilizando propiedades físicas de los suelos, muestreados de 0 a 20 cm, tales como: %MO; % arc; %are y grado de compactación (DF). Este último relaciona la densidad aparente actual del suelo con la densidad aparente del suelo no compactado (DF =1) (Saxton, 2005, *comun. personal*). Con estos datos, el modelo de SyR, predice las propiedades hidráulicas como la *Ks*, θ_s, y h_e, utilizados como parámetros de entrada para GA. La validez de las FPT de SyR se limitan para valores de MO ≤ 8% y grados de compactación 0,9 ≤ DF ≤1,3. Por esta razón no se aplicó al Potrero 13b (ARECO) y al suelo de FAUBA1.

La tasa de infiltración ($f_{(t)}$) se obtuvo derivando (3) respecto del tiempo:

$$f_{(t)} = K\left(\frac{h_f\ \Delta\theta}{F(t)} + 1\right) \qquad (4)$$

El valor de la sortividad So del modelo de Philip está relacionado con los parámetros de GA a través de la ecuación (Regalado *et al*. 2003):

$$S_0 \cong \sqrt{2\,K\,h_f\ \Delta\theta} \qquad (5)$$

que se deduce a partir de la expresión de la tasa de infiltración de GA para tiempos cortos de ensayo.

En los potreros 13a y 19 de Carmen de Areco, con el fin de evaluar el comportamiento de las FPT, se estimaron los valores de humedad para distintos potenciales mátricos (curva de retención hídrica), que fueron comparados con los valores experimentales obtenidos mediante el método de la placa de Richards (Klute, 1986), para valores de presión entre 10 y 1.500 kPa (Laboratorio Ingeis, Conicet). La bondad de la predicción de dichas funciones a los datos experimentales se evaluó por medio del cálculo del coeficiente de eficiencia (*CE*) de Nash-Sutcliffe (King, 2000; Evans *et al*., 2003):

$$CE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(E_i - M_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(M_i - \bar{M}\right)^2}$$

en donde E_i y M_i son los valores estimados y medidos respectivamente para cada una de las *N* determinaciones, y $\overline{M}$ el promedio de los valores medidos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La clasificación textural de los suelos de los distintos sitios de ensayo, los valores medios obtenidos de los porcentajes de arcilla, arena y materia orgánica, densidad aparente y humedad volumétrica inicial con sus respectivos coeficientes de variación se muestran en la Tabla 1. Se observa que el potrero 13b (Areco) y el sector S1 (FAUBA1) tienen los más altos contenidos de materia orgánica (1,4 y 0,84 g kg^{-1}) respectivamente, que provienen, en el primer caso de la alta concentración de guano vacuno y en el segundo, del uso intensivo de material de enmienda durante el período de producción hortícola. Estos valores se corresponden con una baja densidad aparente (0,98 g cm^{-3} y 1,05 g cm^{-3}). En cuanto a la humedad inicial no hubo diferencias significativas entre grupos de ensayos para FAUBA1.

En la Tabla 2 se presentan los parámetros de los modelos de K-L y Ph obtenidos del ajuste global a los datos experimentales de infiltración de cada grupo de ensayos, con eficiencia R^2. La última columna muestra los parámetros del modelo predictivo de GA, obtenidos a partir del modelo textural de SyR mediante las FPT y el coeficiente de eficiencia CE de la predicción.

Puede verse que las bondades de ajuste (R^2) de los modelos de K-L y Ph a los datos experimentales de infiltración acumulada fueron iguales en cada grupo de ensayos, con valores mayores a 0,6. La predicción de la infiltración mediante GA, en base a las FPT de SyR, para los dos grupos de ensayos de Areco, con excepción del Potrero 13b y en FAUBA2 tienen un CE alto.

En la Figura 2 se muestran algunos gráficos de infiltración acumulada en función del tiempo para los ensayos de cada grupo en distintos sitios. Además, en línea llena se observa el ajuste global de los modelos K-L y Ph y la función predictiva de GA. Se observa una mayor coincidencia entre los valores experimentales y los predichos para los mayores tiempos de infiltración en el grupo de ensayos M1-M2, respecto del grupo M3-M4. Esto puede deberse a la existencia de heterogeneidad en el perfil a partir de los 20 cm de profundidad, que no ha sido tenida en cuenta en el modelo homogéneo de GA.

En la Tabla 3, se muestran los valores de la tasa de infiltración básica (fo) para todos los grupos de ensayos, que se obtuvieron de la derivada temporal de las funcio-

Tabla 1. Porcentajes de arcilla (% arc), arena (% are), contenido de materia orgánica (MO), densidad aparente (δap) y humedad inicial (θi) de los suelos de Areco, FAUBA1 y FAUBA2.

Table 1. Percents of clay (% arc), sand (% are) , organic matter content (MO), bulk density (δap) and initial wetness (θi) of Areco, FAUBA1 and FAUBA2 soils.

Sitios	Textura	Grupos de ensayos	% arc	% are	MO	δap	CV%	θi	CV%
					g kg $^{-1}$	g cm^{-3}	-	cm^3 cm^{-3}	-
ARECO	franco limoso	Potrero 13 a	22,5	17,5	0,64 a	1,31 a	4,8	0,34 a	10,6
		Potrero 13 b	12,5	37,5	1,40 b	0,98 b	12,1	0,42 b	6,8
		Potrero 19	18,1	20,0	0,38 c	1,37 a	3,7	0,33 a	5,3
FAUBA1	arcillo limoso	S1	40,2	13,7	0,84 b	1,05 a	3,1	0,31 a	4,9
		S2	41,4	12,5	0,57 a	1,14 b	2,7	0,32 a	6,9
		S3	39,2	13,9	0,65 ab	1,08 ab	8,0	0,29 a	7,0
FAUBA 2	franco arcilloso	M1 M2	28	30	0,28	1,06 a	3,5	0,22 a	4,2
		M3 M4	28	30	0,28	1,13 a	3,0	0,31 b	5,0

Letras distintas indican diferencias significativas($p <= 0,05$) entre grupos de ensayos del mismo sitio.

Tabla2. Parámetros de los modelos de infiltración de Kostiakov-Lewis (K-L), Philip (Ph) y Green-Ampt (GA).

Tabla2. Parameters of Kostiakov-Lewis (K-L), Philip (Ph) and Green-Ampt's (GA) models infiltration.

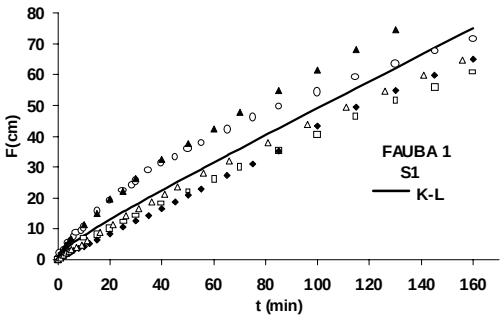
Sitios	Grupos de ensayos	K-L				Ph			GA			
		k	n	f	R^2	So	A	R^2	Ks	h_f	θs	CE
		cm min^{-n}	-	cm min^{-1}	-	cm min$^{-0,5}$	cm min^{-1}	-	cm min^{-1}	cm	cm^3 cm^{-3}	-
ARECO	P. 13 a	0,42	0,95	-0,27	0,84	0,22	0,03	0,83	0,007	63,4	0,51	0,79
	P. 13 b	0,21	0,99	-0,19	0,70	0,04	0,09	0,68	-	-	-	-
	P. 19	0,22	0,58	0,02	0,87	0,25	0,02	0,87	0,01	61,0	0,48	0,85
FAUBA1	S1	1,65	0,37	0,40	0,95	1,22	0,37	0,95	-	-	-	-
	S2	1,98	0,95	-1,42	0,40	1,24	0,02	0,39	-	-	-	-
	S3	2,12	0,71	0,03	0,94	2,87	0,28	0,94	-	-	-	-
FAUBA2	M1 M2	1,10	0,46	0,04	0,99	1,01	0,03	0,99	0,04	69,8	0,59	0,98
	M3 M4	0,28	0,62	-0,01	0,99	0,34	0,004	0,99	0,03	15,5	0,53	0,95

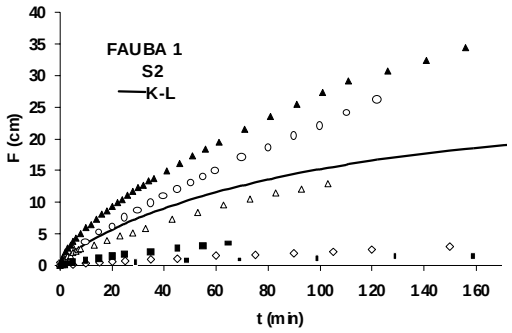
P: Potrero.

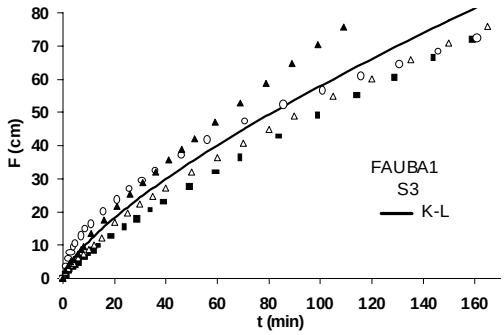
Tabla 3. Valores de la infiltración básica (fo) para todos los grupos de ensayos y modelos.

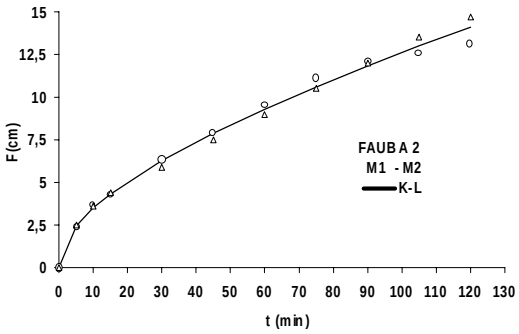
Table 3. Basic infiltration values (fo) for all sets of tests and models.

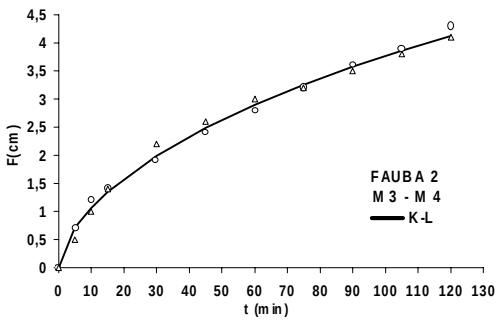
Sitios	Grupo de ensayos	K-L	Ph	GA
		fo	fo	fo
		cm min^{-1}	cm min^{-1}	cm min^{-1}
ARECO	Potrero 13a	0,03	0,04	0,03
	Potrero 13b	0,01	0,01	-
	Potrero 19	0,03	0,03	0,03
FAUBA1	S1	0,42	0,41	-
	S2	0,03	0,07	-
	S3	0,35	0,39	-
FAUBA 2	M1 M2	0,07	0,07	0,05
	M3 M4	0,02	0,02	0,03

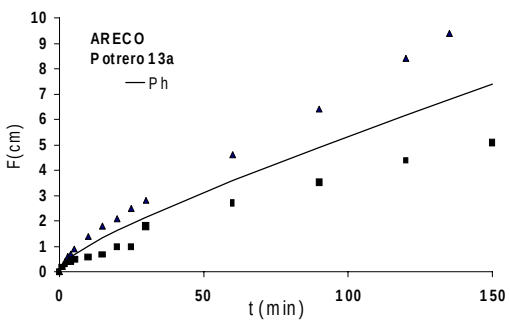

F(cm)
t (min)
FAUBA 1
S1
K-L

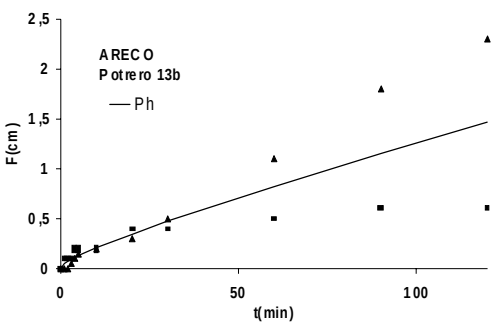

FAUBA 1
S2
K-L
F (cm)
t (min)


F (cm)
t (min)
FAUBA1
S3
K-L


F(cm)
t (min)
FAUBA 2
M1 - M2
K-L


F(cm)
t (min)
FAUBA 2
M 3 - M 4
K-L


F(cm)
t (min)
ARECO
Potrero 13a
Ph


F(cm)
t(min)
ARECO
Potrero 13b
Ph

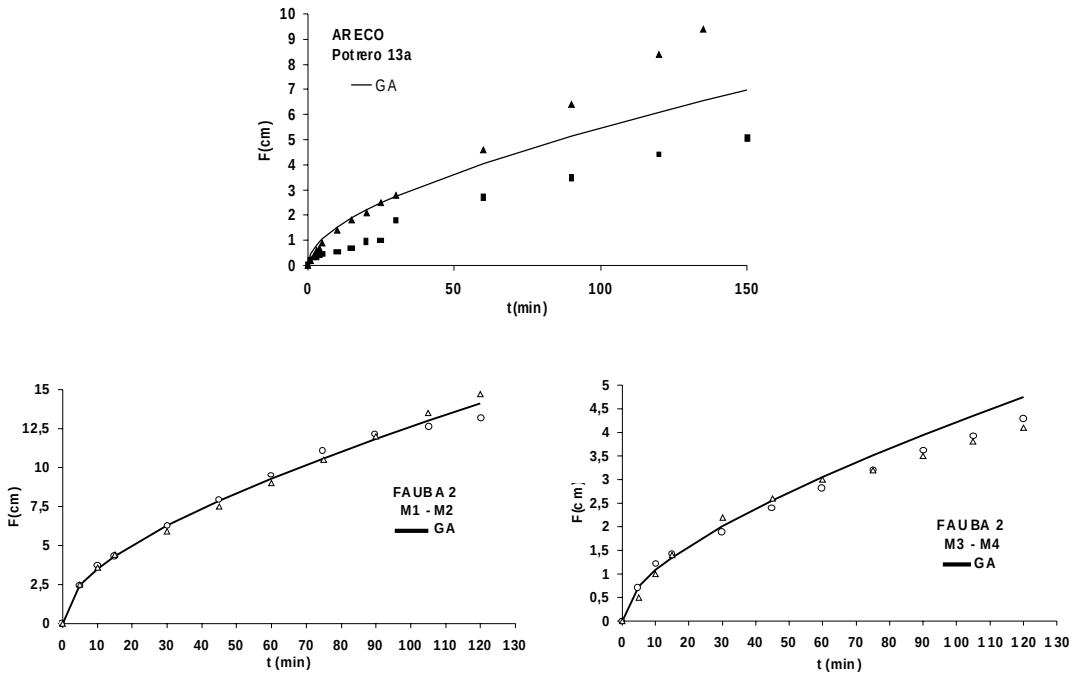


Figura 2. Ajuste global de los modelos de Kostiakov-Lewis (K-L) y Philip (Ph) y validación de Green-Ampt (GA) (línea llena) a los datos experimentales de infiltración acumulada (símbolos distintos corresponden a ensayos diferentes) de los distintos grupos de ensayos.

Figure 2. Global fitting of Kostiakov-Lewis (K-L) and Philip (Ph) models and validation of Green-Ampt (GA) (solid line) to experimental cumulative infiltration data (different symbols correspond to different tests) of the different sets of tests.

nes de ajuste de infiltración acumulada de K-L, Ph y predictiva de GA. Los valores de fo hallados con todos los modelos exhiben igual orden de magnitud para cada grupo de ensayos. Se desprende que los modelos convencionales presentan un buen comportamiento para describir el proceso de infiltración.

El bajo valor de infiltración básica obtenido en el potrero 13b (ARECO), a pesar de que el suelo posee una elevada concentración de MO, es posiblemente debido a la alta compactación de los primeros centímetros de suelo, producida por el pisoteo de animales, tal como afirman Taboada y Micucci (2002).

En FAUBA1, los valores máximos de fo hallados para los sectores S1 y S3 podrían atribuirse a su localización en antiguos camellones de cultivo, con baja densidad aparente y alto contenido de materia orgánica (Seguel *et al*., 2003). No se descarta la posible presencia de grietas debida a los altos contenidos de arcilla y macroporos como resultado de los antiguos laboreos. En cambio, las tasas de infiltración en el sector S2, situado en el surco entre camellones, acusan valores sensiblemente más bajos, debido probablemente, a la acumulación de partículas de arcilla y limo arrastradas por escorrentía superficial durante la lluvia. En FAUBA2, los ensayos M1 y M2 mostraron una fo mayor que en M3 y M4, sin embargo, los valores de densidad aparente en estos dos sitios son estadísticamente iguales.

En la Figura 3a y 3b se observan las curvas de retención hídrica, graficadas a partir de los valores de contenido de humedad medidos y predichos por las funciones de Saxton y Rawls para cada una de las succiones ensayadas**.** Los valores del coeficiente de eficiencia para el potrero 13a y el 19 fueron 0,90 y 0,84, respectivamente, lo cual indica un alto poder predictivo del modelo.

En la Tabla 4 se muestran los valores de sortividad So del modelo de Philip obtenidos del ajuste global a los datos experimentales de infiltración acumulada (Tabla 2) y los valores de So predichos según la ecuación (5) con los parámetros hidráulicos de Sy R (Tabla 2). Los valores de So predichos según la ecuación (5), coinciden con So de (Ph) con un CE = 0,87.

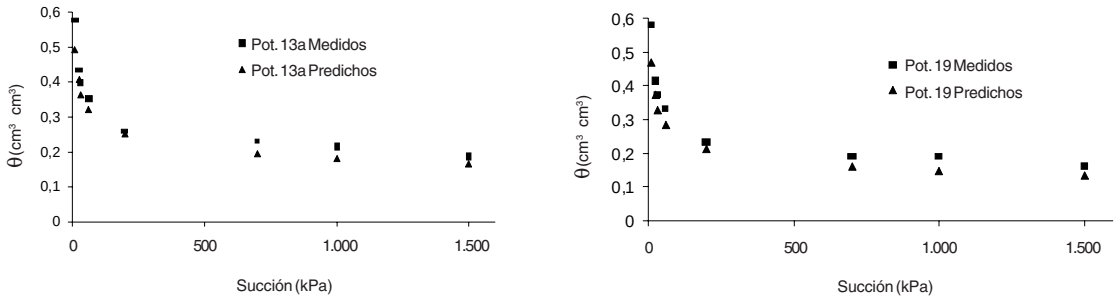


Figura 3. Valores de contenido de humedad medidos y predichos por las FPT de Saxton y Rawls, en función del potencial mátrico para el Potrero 13a (a) y el Potrero 19 (b).

Figure 3. Measured and predicted soil water content values from FPT of Saxton and Rawls, as a function of matric potential for 13a (a) and 19 (b) plots.

Tabla 4. Valores de la sortividad (So) obtenidos con el modelo de Philip (Ph) y predichos con Saxton y Rawls (SyR).

Table 4. Values of the sortivity (So) obtained from Philip (Ph) model and predicted ones with Saxton y Rawls (SyR).

Sitios	Grupos de ensayos	So (Ph)	So (SyR)
		cm $min^{-0,5}$	cm $min^{-0,5}$
ARECO	Potrero 13 a	0,22	0,27
	Potrero 19	0,25	0,30
FAUBA 2	M1 M2	1,01	1,01
	M3 M4	0,34	0,32

CONCLUSIONES

Los modelos de Kostiakov-Lewis y Philip son altamente eficientes para describir el comportamiento de la infiltración de agua en los suelos estudiados. Las diferencias observadas en las tasas de infiltración se atribuirían, más allá de la clasificación del suelo, a otros factores tales como el uso de la tierra y la influencia de la carga animal. Este último factor deberá ser estudiado en el futuro más intensivamente, teniendo en cuenta que son pocos los datos obtenidos hasta el momento.

El modelo predictivo de Green-Ampt, a partir de las funciones de pedotransferencia de Saxton y Rawls, tuvo buena predicción en algunos ensayos, aunque se vislumbra la necesidad de generar funciones de pedotransferencia para suelos de una misma región, así como aplicar modelos para suelos no homogéneos. A pesar de la limitación que presentan las funciones de pedotransferencia de Saxton y Rawls en su aplicabilidad, fueron buenas predictoras de los valores de sortividad y humedad en función del potencial mátrico, para los suelos estudiados. Se aconseja, sin embargo, realizar un estudio preliminar con un número pequeño de ensayos y analizar la bondad de predicción de estas funciones en los sitios que se investigan, descartando de este modo, situaciones que se apartan de las hipótesis del modelo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el Proyecto G089 UBACyT 2004-2007: Elementos de diagnóstico de contaminación del suelo y el agua subterránea por producción animal intensiva.

BIBLIOGRAFÍA

Aragón, A; J Dipardo; R Balbuena & H Chidichimo. 1997. Evolución temporal de la infiltración en tres sistemas de labranza. II Congreso Chileno de Ing. Agrícola. CIACH 97.

Blake, GR & KH Hartge.1986. Bulk density. *In*: Methods of soil analysis. Part 1 *ed:* A. Klute Agronomy 9. ASA-SSSA. Madison, WI, USA.

Burt, CM. 1995. The Surface Irrigation Manual - A Comprehensive Guide to Design and Operation of Surface Irrigation Systems. Waterman Industries. Exeter, CA. 373 p.

Cabria, F & JP Culot. 1999. Sortividad y conductividad hidráulica saturada de Udoles del sudeste bonaerense, Argentina. *Ciencia del Suelo* 17(1): 8-19.

Chambouleyron, J. 1993. Riego y Drenaje. Cátedra de Hidrología Agrícola. Facultad de de Ciencias Agrarias UNCuyo. Mendoza, Argentina. 556 p.

Evans, B; SA Sheeder & DW Lehning. 2003. A spatial technique for estimating streambank erosion based on watershed characteristics. *Journal of Spatial Hydrology* 3: 1-13.

Gee, GW and JW Bauder. 1986. *In:* Methods of Soil Analysis. Part 1. ASA - SSSA, Madison Wisconsin (USA). Agronomy N° 9. Ed Klute. A 383-412.

GraphPad Prism version 4.00 for Windows. 2005. GraphPad Software. San Diego California .

INTA. 1989. Mapa de suelos de la Provincia de Buenos Aires. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca.

InfoStat (2002). InfoStat, versión 1.1. Manual del Usuario. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba. Primera Edición, Editorial Brujas Argentina.

King, KW. 2000. Response of Green-Ampt Mein-Larsen Simulated Runoff Volumes to Temporally Aggregated Precipitation. *Journal of the American Water Resources Association* 36(4): 791-794.

Klute, A. 1986. Water retention: Laboratory methods. Pp. 597-618 *En:* A Klute *(ed.)*. Methods of soil analysis. Part 1. ASSA, Inc, Publisher. Madison, Wisconsin, USA.

Lado, M; A Paz & M Ben-Hur. 2004. Organic Matter and Aggregate Size Interactions in Infiltration, Seal Formation, and Soil Loss. *Soil Sci Soc Am J* 68: 935-942.

Moreira, L; AM Righetto & VM Medeiros. 2004. Soil hydraulics properties estimation by using pedotransfer functions in a northeastern semiarid zone catchment, Brazil. International Environmental Modelling and Software Society, 2004, Osnabrueck. Complexity and Integrated Resources Management, Transactions of the 2nd Biennial Meeting of the International Environmental Modelling and Software Society, iEMSs 2004. *Manno, Switzerland* 2: 990-995.

Narro Faría, E. 1994. Física de suelos, con enfoque agrícola. Editorial Trillas. México. 194 p.

Osuna Ceja, ES & JS Padilla Ramirez. 1998. Estimación de la sorbilidad e infiltración usando datos de simulación de lluvia para tres tipos de suelos de la zona semiárida de México. *Terra* 16(4): 293-302.

Page, AL. 1982. Methods of soil analisys. Chemical and microbiological properties. SSSA, Inc. Publisher. Madison, Wisconsin, USA. 1159 p.

Ravi, V & JR Williams. 1998. Estimation of Infiltration Rate in the Vadose Zone: Compilation of Simple Mathematical Models. EPA (Environmental Protection Agency) National Risk Management Research Laboratory.26 p.

Regalado, CM; A Ritter; J Álvarez Benedí & R Muñoz Carpena. 2003. Medida de la Sortividad del suelo con el permeámetro de Philip-Dunne. Estudios de la Zona No Saturada del Suelo VI: 119-124.

Saxton, K & WJ Rawls. 2006. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 1569-1578.

Seguel, O; V García De Cortázar & M Casanova. 2003. Variación en el tiempo de las propiedades físicas de un suelo con adición de enmiendas orgánicas. *Agricultura Técnica* (Chile) 36(3): 287-297.

Soil Survey Staff.1994. Keys to soil taxonomy *In:* Agric. Handb. 6th. ed. U.S. Gov.

Print. Office. United Sates Department of Agriculture - Soil Conservation Service. Washington, DC, USA.

Taboada, M & F Micucci. 2002. Fertilidad física de los suelos. Editorial Facultad de Agronomía Universidad de Buenos Aires. Bs. As. 79 p.

Tomasella, J; Y Papechepsky; S Crestana & WJ Rawls. 2003. Comparison of Two Techniques to Develop Pedotransfer Functions for Water Retention. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 1085-1092.

Young, E. 1991. Infiltration measurements, a review. *Hydrological processes* 5: 309-320.